بهره برداری بهینه از مخازن سدها با استفاده از مکانیزم تظریف تطبیقی قطعی در الگوریتم مورچه ها*

محمد هادی افشار[۱] ابراهیم رضایی سنگدهی[۲] رامتین معینی[۳]

چکیده در این تحقیق از الگوریتم بهینه سازی جامعه مورچه ها و مکانیزم تظریف تطبیقی قطعی در حل مسایل بهینه سازی استفاده می شود. با توجه به اینکه بسياري از مسائل واقعي پيوسته مي باشند، به کار گیری الگوریتم گسسته جامعه مورچه ها در حل آنها نیازمند به گسسته سازی متغیرهای تصمیم مساله می باشد. چگونگی گسسته سازی بر روی همگرائی و کیفیت جوابها تاثیر می گذارد. در این تحقیق مکانیزمی به نام تظریف تطبیقی قطعی، به منظور بهبود عملکرد الگوریتم مورچه ها و رسیدن به جواب هایي در حد جواب هاي بهینه مطلق، ارائه شده است. مکانیزم مورد نظر روشی تکراری است که در آن فضاي جستجو مساله در هر تکرار، به اطراف جواب هاي بهینه حاصل شده در تکرارهای قبلي محدود می‌شود. در این مقاله کاربرد مکانیزم فوق در نمونه هایي از مسائل پیچیده رياضي و مساله بهره برداری بهینه از سدها مورد بررسی قرار گرفته و با نتایج حاصل از مدل سازی مساله در نرم افزار LINGO و سایر روش‌های موجود مقایسه شده است. مقایسه نتایج نشاندهنده آنست که مکانیزم به کار گرفته شده تاثیر زیادی در بهبود جواب‌های مساله داشته وتوانایی پیدا کردن جواب‌هائی نزدیک به جواب بهینه مطلق را با هزینه محاسباتی کم دارا می باشد.

واژه‌های کلیدی الگوریتم بهینه سازی جامعه مورچه ها، مکانیزم تظریف تطبیقی قطعی، بهره برداری بهینه از مخازن سدها

Optimal Reservoir Operation using Deterministic Adaptive Refinement mechanism for Ant Algorithm

M. H. Afshar E. Rezaee Sangdehi R. Moeini

Abstract *Ant Colony Optimisation (ACO) algorithm and adaptive refinement mechanism are used in this paper for solution of optimization problems. Many of the real engineering problems are، however، of continuous nature and finding their solution by discrete ant based algorithms requires discretisation of the decision variables in which affected the convergence and performance of the algorithm. In this paper an adaptive refinement mechanism is suggested to improve the performance of ant algorithms in solving continuous optimization problems. The proposed mechanism is an iterative method in which the search space of the problem at each iteration is limited to a small range around the optimal solution obtained in previous iteration. The application of the proposed mechanism to solve some benchmark function optimization problems and reservoir operation problem is considered and the results are presented.Compression of the results indicate the efficiency and effectiveness of the proposed method to improve the performance of the ant algorithms for continuous optimization problems.*

Key Works Ant Colony Optimization Algorithm، Deterministic Adaptive Refinement mechanism، Optimal Reservoir Operation

---

* نسخه‌ی اول مقاله در تاریخ ۱۳۸۸/۱۲/۲و نسخه‌ی نهایی آن در تاریخ ۱۳۹۰/۷/۵ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) دانشیار، قطب علمی هیدرو انفورماتیک محیطی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

(۲) کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

(۳) نویسنده‌ی مسئول، دانشجوی دکتری, دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

مقدمه

تاکنون روش‌های مختلفی به منظور حل مسائل بهینه سازی پیشنهاد شده و بکار گرفته شده است. برخی از این روشهای حل مسائل بهینه سازی توانائی رسیدن به جوابهای بهینه مطلق را دارا می باشند و برخی دیگر مانند الگوریتم های فراکاوشی (Meta heuristic Algorithms) تنها به رسیدن به جواب‌های خوب و مناسب بسنده می‌کنند. فلسفه پیدایش روش‌هایی که توانائی رسیدن به جوابهای نزدیک به جواب بهینه را دارا می باشند را می توان در این واقعیت دانست که برخی از مسائل بهینه سازی شدیدا غیرخطی می باشند به گونه ای که الگوریتمی صریح برای حل آنها وجود ندارد [1]. از طرفی در بسیاری از مسائل واقعی، از جمله مسائل مهندسی آب، تصمیم گیرنده ها تنها نیازمند جوابهای خوب و مناسب (نه لزوما جواب بهینه مطلق) می باشند. بر این اساس امروزه استفاده از روشهای کاوشی و یا الگوریتم‌های تکاملی (Evolutionary Algorithms)، که تضمین کننده رسیدن به جوابهای نزدیک به جواب بهینه می باشند، مورد توجه قرار گرفته است .

الگوریتم های فراکاوشی نامی معمول برای روش‌هایی است که عموماً برگرفته از طبیعت هستند و اساسا سعی در ترکیب اصول اولیه روشهای کاوشی برای رسیدن به یک جستجوی موثر و کارا در محدوده مورد نظر دارند. در سالهای اخیر الگوریتم‌های فراکاوشی با پیشرفتی سریع در حل مسائل پیچیده و مشکل بهینه سازی مورد استفاده قرار گرفته اند. الگوریتم نورد شبیه سازی شده (Simulated Annealing) (SA)، الگوریتم ژنتیک (Genetic Algorithm) (GA)، جستجوی ممنوعه (Tabu Search) (TS)، جستجوی موضعی اکتشافی (Explorative Local Search) (ELS) و الگوریتم بهینه سازی جامعه مورچه ها (ACO) (Ant Colony Optimization Algorithm) را می توان به عنوان نمونه هایی از این الگوریتم ها نام برد. الگوریتم بهینه سازی جامعه مورچه ها اولین بار توسط Colorni و همکارانش در سال ۱۹۹۱ پیشنهاد شد [2]. الگوریتم سیستم مورچه‌ها (Ant System) (AS) اولین الگوریتم از دسته الگوریتم‌های پیشنهادی جامعه مورچه ها بود. در طول سالیان اخیر الگوریتم های مختلف دیگری نیز بر پایه این الگوریتم پایه اولیه ارائه شده است که در ادامه به برخی از آنها اشاره می شود. از جمله، Dorigo و Gambardella در سال ۱۹۹۷ الگوریتم سیستم جامعه مورچه ها (ACS) (Ant Colony System) را معرفی نمودند [3]. Bullnheimer و همکارانش در سال ۱۹۹۹، با اصلاح الگوریتم سیستم مورچه ها، الگوریتم سیستم مورچه های ترتیبی (ASrank) (Ranked Ant System) را پیشنهاد نمودند [4]. Stutzle و Hoos در سال ۲۰۰۰، الگوریتم سیستم مورچه های بیشینه - کمینه (MMAS) (Max-Min Ant System) را معرفی نمودند [5]. از جمله دیگر الگوریتم های پیشنهادی، می توان به الگوریتم سیستم مورچه های بهترین – بدترین (Best-Worst Ant System) [6]، الگوریتم سیستم مورچه ترکیبی Hybrid Ant System) [7] و الگوریتم مقید جامعه مورچه ها (Constrained Ant Colony Optimization Algorithm) [8] اشاره نمود. در ادامه به برخی از کاربرد های الگوریتم بهینه سازی جامعه مورچه ها در حوزه مهندسی آب از زمان پیدایش این الگوریتم اشاره شده است. اولین کار گزارش شده دراین حوزه مربوط به Abbaspuor و همکارانش در سال ۲۰۰۱ [9] می باشد، که از این الگوریتم برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاکهای غیراشباع استفاده نموده اند. پس از آن، Simpson و همکارانش در سال ۲۰۰۱ [10]، با استفاده از این الگوریتم، مساله طراحی بهینه شبکه آب را مدل نموده و پارامتر های آن را محاسبه نمودند.Maier و همکارانش در سال ۲۰۰۳ [11] ازاین الگوریتم به منظور طراحی بهینه یک سیستم شبکه توزیع آب استفاده کردند. آنها با مقایسه نتایج به این نتیجه رسیدند که این الگوریتم یک الگوریتم قابل رقابت با الگوریتم ژنتیک در مساله طراحی بهینه شبکه توزیع آب می باشد. Zecchin و همکارانش در

سالهای ۲۰۰۳ و ۲۰۰۵ [12,13] ابتدا از الگوریتم مورچه‌های بیشینه - کمینه در مساله طراحی بهینه شبکه آب استفاده نمودند و سپس عملکرد الگوریتم سیستم مورچه ها را در مقایسه با الگوریتم مورچه های بیشینه - کمینه در مساله طراحی بهینه شبکه آب مقایسه نمودند. افشار در سال ۲۰۰۶ ابتدا از الگوریتم مورچه های بیشینه - کمینه در مساله طراحی بهینه شبکه آب استفاده نمود [1] و سپس با بکار گیری مکانیزم تظریف تطبیقی قطعی (Deterministic Adaptive Refinement) (DAR) در الگوریتم مورچه ها، عملکرد این الگوریتم را بهبود بخشید و اثر این مکانیزم را در طراحی بهینه سیستم کنترل سیلاب مورد بررسی قرار داد[14] . همچنین افشار و معینی در سال ۲۰۰۸ [8] الگوریتم مقید جامعه مورچگان را پیشنهاد نمودند و کاربرد آنرا در بهره برداری بهینه از مخازن سدها مورد بررسی قرار دادند.

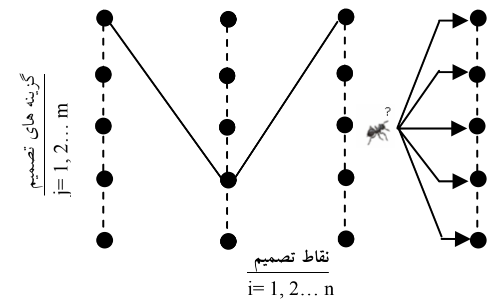
الگوریتم استاندارد اولیه پیشنهادی جامعه مورچه ها اساسا برای حل مسائل بهینه سازی گسسته، که در آنها متغیر های تصمیم تنها مقادیرخاصی را می پذیرند، ارائه شده است. بنابراین، به کارگیری این الگوریتم برای حل مسائل پیوسته نیازمند تبدیل فضای پیوسته جستجوی مساله به فضای جستجوی گسسته از طریق گسسته سازی متغیرهای تصمیم پیوسته مساله می باشد. کیفیت جواب نهایی و عملکرد مکانیزم جستجو تا اندازه زیادی به ابعاد بازه های گسسته سازی متغیرهای تصمیم پیوسته مساله وابسته است. در گسسته سازی درشت متغیرهای تصمیم مساله ممکن است گسسته سازی ها به گونه ای انجام شده باشند که شامل نقاط بهینه مساله نباشند و گسسته سازی های ریز موجب افزایش تلاش محاسباتی و بعضا کاهش کیفیت جواب می گردند. مکانیزم تظریف تطبیقی قطعی پیشنهاد شده در این مقاله، جایگزین بسیارخوبی برای جلوگیری از گسسته سازی های زیاد متغیرهای تصمیم مساله به منظور ساختن فضای جستجو مساله می باشد، زیرا این روش نیاز به هزینه عملیاتی کمتری دارد و به جوابهای دقیق تری نیز دست می‌یابد .

در این مقاله کاربرد مکانیزم پیشنهادی (تظریف تطبیقی قطعی) در الگوریتم سیستم مورچه های بیشینه - کمینه به منظور بهینه سازی توابع ریاضی و مسائل بهره برداری بهینه از مخزن مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده، با نتایج بدست آمده از بکارگیری روشهای دیگر و با نتایج بهینه بدست آمده از مدل سازی مساله در نرم افزار LINGO (نسخه ۸) مقایسه شده است. مقایسه نتایج نشان دهنده آنست که مکانیزم پیشنهادی از قابلیت بالایی در دستیابی به جواب بهینه یا نزدیک به بهینه با تلاش محاسباتی کم برخوردار بوده و می تواند در حل مسائل بهینه سازی بزرگ مقیاس پیوسته به کار گرفته شود.

الگوریتم بهینه سازی جامعه مورچه ها

دردهه های اخیر استفاده از مفاهیم هوش جمعی (Swarm Intelligence) موجود در زندگی اجتماعی حشرات، به منظور ایجاد سیستمهای مصنوعی، توجه بسیاری از محققین را به خود جلب نموده است. از جمله این حشرات می توان به مورچه اشاره کرد. مورچه ها در طبیعت عموما کور هستند؛ اما می توانند با استفاده از حس قوی بویایی خود کوتاهترین مسیر بین لانه و منبع غذا را تعیین نمایند. وقتی مورچه ای به دنبال غذا می گردد، در طول مسیر خود ماده بوداری به نام فرمون (Pheromone) به جای می گذارد که سایر مورچه‌هایی که در جستجوی غذا می باشند را به عبور از آن مسیر تشویق می نماید. بر این اساس، Colorni و همکارانش در سال ۱۹۹۱ الگوریتم سیستم مورچه را معرفی نمودند [2]. به منظور حل مساله بهینه سازی با استفاده از الگوریتم بهینه سازی جامعه مورچه ها، در ابتدا، می بایست گراف مناسب برای مساله تعریف نمود [3]. به عنوان نمونه گراف G=(D,L,C) را در نظر بگیرید، که $D=\{d_1,d_2,......,d_n\}$ مجموعه نقاط تصمیم می باشد که در این نقاط تصمیم می گیریم؛ $L=\{L_{ij}\}$ مجموعه انتخاب های j (j=1,2,…, m) در هر یک از نقاط تصمیم

i (i=1, 2… n) و $C=\{c_{ij}\}$ مجموعه هزینه های هر یک از انتخاب های مجموعه L میباشند. شکل (۱) نمونه ای از گراف تعریف شده برای مساله را نشان می‌دهد. در این شکل خط چین های عمودی نشاندهنده نقاط تصمیم، دوایر توپر نشاندهنده گزینه های تصمیم و خطهای پررنگ مورب نشاندهنده یک جواب ساخته شده توسط مورچه فرضی می باشد.



شکل ۱ گراف الگوریتم بهینه سازی جامعه مورچه ها

بعد از تعریف گراف مناسب مساله، مورچه ها بر روی نقاط تصمیم مساله قرار داده شده و با انتخاب گزینه های تصمیم موجود در هریک از نقاط تصمیم، شروع به حرکت می کنند. انتخاب گزینه های تصمیم موجود در هریک از نقاط تصمیم توسط مورچه ها، توسط رابطه احتمالاتی تعیین سیاست تصمیم گیری انجام می شود. رابطه تعیین سیاست تصمیم گیری در هر نقطه تصمیم به صورت تابع احتمالاتی زیر بیان می گردد :

$$p_{ij}(k,t)=\frac{\left[\tau_{i,j}(t)\right]^{\alpha}\left[\eta_{i,j}\right]^{\beta}}{\sum_{j=1}^{m}\left[\tau_{i,j}(t)\right]^{\alpha}\left[\eta_{i,j}\right]^{\beta}} \qquad (۱)$$

که در رابطه فوق، $p_{ij}(k,t)$ احتمال اینکه مورچهk درتکرار t و نقطه تصمیم i، گزینه تصمیم j را انتخاب نماید؛ $\tau_{i,j}(t)$ مقدار فرمون موجود بر روی گزینه تصمیم j در نقطه تصمیم i و تکرار t؛ $\eta_{i,j}$ اطلاعات کاوشی مربوط به گزینه تصمیم j در نقطه تصمیم i و α و β پارامترهایی هستند که نسبت وزنی بین فرمون و مقدار کاوشی را کنترل می نمایند.

با توجه به رابطه احتمالاتی فوق، مورچه ها در هر نقطه تصمیم، گزینه مورد نظر را انتخاب کرده و به نقطه تصمیم بعدی می روند. هنگامی‌که مورچه از کلیه نقاط تصمیم عبور کند، یک جواب برای مساله ساخته شده است. این روند برای کلیه مورچه های یک جامعه در هر تکرار انجام می شود و قبل از شروع تکرار بعدی لازم است که فرمون مسیرها به روز رسانی (Update) شوند. رابطه به روز رسانی فرمون موجود بر روی گزینه های تصمیم در انتهای هر تکرار به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\tau_{i,j}(t+1)=\rho\tau_{i,j}(t)+\Delta\tau_{i,j}^{k}(t) \qquad (۲)$$

که در رابطه فوق؛ $\tau_{i,j}(t+1)$ مقدار فرمون موجود بر روی گزینه تصمیم j در نقطه تصمیم i در تکرارt+1؛ $\tau_{i,j}(t)$ مقدار فرمون موجود بر روی گزینه تصمیم j در نقطه تصمیم i در تکرار t؛ ρ ضریب تبخیر فرمون، که موجب کاهش میزان فرمون براساس مقدار ضریب تعریف شده می گردد، و $\Delta\tau_{i,j}^{k}(t)$ مقدار افزایش فرمون موجود بر روی گزینه تصمیم j در نقطه تصمیم i در تکرار t توسط مورچه k می باشد.. مقدار تغییرات فرمون ($\Delta\tau_{i,j}^{k}(t)$) درمسائل حداقل سازی به صورت زیر تعریف می شود [15]:

$$\Delta\tau_{i,j}^{k}(t)=\begin{cases} R/f_t^k(\phi) & \text{اگر در نقطه تصمیم i گزینه تصمیم j توسط مورچه k ام انتخاب گردد} \\ 0 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases}$$

(۳)

که در رابطه فوق $f_t^k(\phi)$ مقدار تابع هدف به ازای جواب ساخته شده به وسیله مورچه k ام در تکرار t و R مقدار ثابتی است که ضریب بازگشت فرمون نامیده می شود. در این مقاله، از بین الگوریتم های مختلف پیشنهادی جامعه مورچه ها، الگوریتم سیستم مورچه های بیشینه - کمینه انتخاب شده و مسائل مورد نظر با بکارگیری این

الگـوریتم مـورد بررسـی قـرار گرفتـه انـد؛ کـه در ادامـه توضیحاتی مختصر درباره این الگوریتم ارائه شده است.

الگوریتم سیستم مورچه های بیشینه - کمینه (MMAS)

الگوریتم سیـستم مورچـه‌هـای بیـشینه - کمینـه توسـط Stutzle و Hoos [5] در سال ۲۰۰۰، ارائـه گردیـد. ایـن الگوریتم بر پایه اصـول الگـوریتم پایـه اولیـه پیـشنهادی سیستم مورچه ها استوار شده است؛ اما تغییراتی به منظور بهبود رونـد همگرائـی در الگـوریتم سیـستم مورچـه هـا صورت گرفته است. در الگـوریتم سیـستم مورچـه هـای بیشینه - کمینه با محدود کـردن مقـادیر فرمـون بـه یـک محدوده تعیین شده $[\tau_{min}, \tau_{max}]$، از همگرایی سریع آن اجتناب می شود. مقادیر محدوده بالائی و پـائینی فرمـون (فرمون حداکثر و حداقل) در تکرار t توسط روابـط زیـر محاسبه می شوند:

$$\tau_{max}(t) = \frac{1}{1-\rho}\frac{R}{f\left(s^{gb}(t)\right)} \tag{٤}$$

$$\tau_{min}(t) = \frac{\tau_{max}(t)\left(1-\sqrt[n]{p_{best}}\right)}{\left(NO_{avg}-1\right)\sqrt[n]{p_{best}}} \tag{٥}$$

که در روابط فوق؛ $f\left(s^{gb}(t)\right)$ مقدار تابع هدف در بهترین مسیر طی شده توسط مورچه ها تـا تکـرار t؛ ρ ضـریب تبخیـر فرمـون؛ R ضـریب بازگـشت فرمـون؛ p_{best} ضریبی است که هر چـه مقـدار ان کمتـر باشـد مرزهـای محدوده فرمون ریزی به هم نزدیـک شـده و بـه تبـع آن احتمال انتخاب گزینه های تصمیم تقریبا نزدیـک بـه هـم می شود و NO_{avg} میانگین تعـداد گزینـه هـای تـصمیم موجود در نقاط تصمیم می باشد. به این ترتیب در انتهای هر تکرار مقدار فرمون مسیر هـا کنتـرل مـی گـردد تـا از مقـدار $\tau_{max}(t)$ تجـاوز نکننـد و از مقـدار $\tau_{min}(t)$ کمتر نگردند. همچنـین ایـن الگـوریتم از رابطـه زیـر بـه منظور به روز رسانی فرمون مسیرها استفاده می کند:

$$\tau_{i,j}(t+1) = \rho\,\tau_{i,j}(t) + \Delta\tau_{i,j}^{lb}(t) \tag{٦}$$

در رابطه فوق، $\Delta\tau_{i,j}^{lb}(t)$ فرمون اضافه شده به هر یک از جزء مسیرهای (گزینه تصمیم j در نقطه تصمیم i) بهترین مسیر طی شده توسط مورچه هـا (بهتـرین مـسیر توسط مورچه l طی شده و جواب s_l را سـاخته اسـت) در تکرار t ام می باشد که از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\Delta\tau_{i,j}^{lb}(t) = \frac{R}{f\left(s_l(t)\right)} I_{s_l}(t)\{(i,j)\} \tag{٧}$$

که در رابطه فوق، $I_A\{a\}$ تابعی اسـت کـه مقـدار آن بـه ازای $a \in A$ برابر با یک و در غیر ایـن صـورت برابـر بـا صفر مـی باشـد و بقیـه پارامترهـای رابطـه پـیش از ایـن تعریف شده اند.

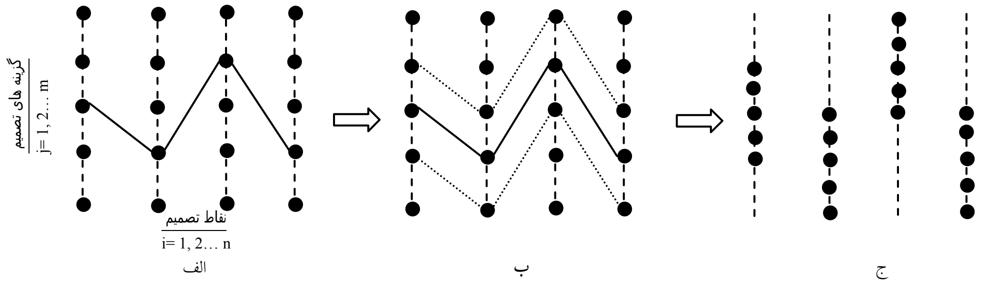
مکانیزم تظریف تطبیقی قطعی

از جمله ویژگی‌های الگوریتم پایه اولیه پیشنهادی جامعـه مورچه‌ها می‌توان به حرکـت مورچـه هـای مـصنوعی در فضای گسسته اشاره نمود. ماهیت این الگوریتم پایه اولیه، جستجو در فضای جستجوی گـسسته مـساله را بـه ایـن روش دیکته می نماید. اما بسیاری از مسائل واقعی دنیای اطراف ما پیوسته می باشند و بنابراین به منظور حـل ایـن مسائل واقعی پیوسـته بـا اسـتفاده از ایـن الگـوریتم، لازم است کـه فـضای جـستجوی مـساله، بـا گـسسته سـازی محدوده های متغیرهـای تـصمیم مـساله، تـشکیل شـود. چگونگی گسسته سازی متغیرهای تصمیم مساله بـر روی کیفیت جوابها و کیفیت همگرائی مساله تاثیر مـی گـذارد؛ به گونه ای که با گسسته سازی درشت متغیرهای تـصمیم مساله ممکن است نقاط بهینه در فـضای جـستجو مـساله قرار نگیرند و گسسته سازی ریز موجب بزرگ شدن ابعاد مساله و افزایش تلاش محاسباتی و بعضا کـاهش کیفیـت جواب می گردد. بنابراین، افزایش قابلیت‌هـای الگـوریتم بهینه سازی جامعه مورچه ها بـه منظـور نزدیکتـر شـدن

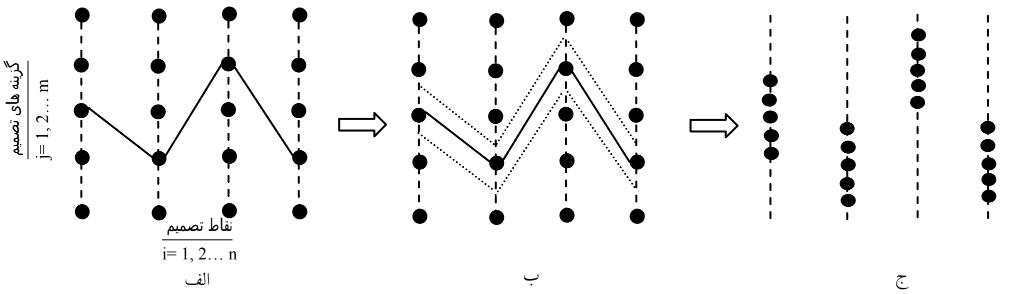
جوابها به جوابهای بهینـه، در حـل مـسائل بهینـه سـازی پیوسته، یکی ازچالشهای این الگوریتم محسوب می شود. بدین منظور، افشار [14] مکانیزم مناسبی بـه نـام مکـانیزم تظریف تطبیقی قطعی (DAR) به منظور رسیدن به جواب هایی نزدیک به جواب های بهینه مطلق مساله ارائه نمود. این مکانیزم، مکانیزمی تکـراری اسـت کـه در آن فـضای جستجو مساله در هر تکرار به اطراف جواب بهینه ایجـاد شده در جستجوی قبلی محدود می شود. به ایـن ترتیـب با محدود کردن فضای جستجو مساله، فاصله گزینه هـای تصمیم در هریک از نقاط تصمیم از یکدیگر کمتر میگردد و بنابراین پس از چند بار اعمال این مکانیزم، جواب‌هـای حاصله، به جـواب‌هـای بهینـه مـساله واقعـی نزدیـک‌تـر می‌گردند. ایـن روش جـایگزین بـسیار خـوبی بـه جـای گسـسته سـازی هـای زیـاد متغیرهـای تـصمیم مـساله و جستجوی در فضای جستجوی بزرگ ساخته شده مـساله می باشد. همچنین، ایـن روش نیـاز بـه هزینـه عملیـاتی کمتری دارد و جواب‌های دقیق‌تری نیز، با بکـارگیری آن، برای مساله حاصل مـی‌شـود. در ایـن مقالـه از دو روش برای محدود کردن فضای جستجوی مساله و اعمـال ایـن مکانیزم استفاده شده؛ که در ادامه توضیحاتی درباره اعمال هریک از آنها ارائه شده است.

۱. روش اول: در ایـــن روش محـــدوده هـــای فـــضای جـستجوی جدیـد مـساله شـامل تعـداد مشخـصی از گزینه‌های تصمیم تعریف شده اولیه در همسایگی جواب بهینه یافته شده در جستجوی قبلی مـی باشـد. در شـکل (۲) فضای جستجوی جدید ساخته شده برای مـساله بـا اعمال روش اول مکانیزم، که در ساختن فضای جستجوی جدید مساله در هر یـک از نقـاط تـصمیم از یـک گزینـه تصمیم در همسایگی جواب بهینه یافته شده قبلی استفاده شده، نشان داده شده است. در ایـن شـکل ابتـدا جـواب بهینه یافته شده درجستجوی قبلی نشان داده شـده اسـت (شکل ۲–الف). سپس یک گزینـه تـصمیم در همـسایگی جواب بهینه یافته شده قبلی، بـه منظـور تعیـین محـدوده های جدید متغیرهای تصمیم و ساختن فضای جـستجوی جدید مساله، انتخاب گردیـده اسـت (شـکل ۲– ب). در نهایت در شکل (۲–ج) فضای جستجوی جدیـد مـساله، که با گسسته سازی محدوده جدید بدست آمده برای هـر متغیر تصمیم و تعیین گزینه های موجود برای آن سـاخته می شود، نشان داده شده اسـت. در ایـن شـکل هـا خـط چین‌های عمودی نشان‌دهنده نقاط تـصمیم، دوایـر تـوپر نشان‌دهنده گزینه های تصمیم، خطهـای پررنـگ مـورب نشان‌دهنده جواب ساخته شده توسـط مورچـه فرضـی و خط چین های مورب نشان دهنده محدوده هـای جدیـد تعریف شده برای هر متغیر تصمیم می باشد.

۲. روش دوم: در این روش مرزهای جدید محدوده های متغیر تصمیم مساله، به منظور ساختن فـضای جـستجوی جدید مساله، با تعیین یک بازه اختیاری شـامل جـواب بهینه بدست آمده از مرحله قبل تعریف مـی شـود کـه در آن دامنه بازه از طریق کاربر تعیین می شود. در شکل (۳) چگونگی انجـام ایـن روش در اعمـال مکـانیزم گـسسته سازی مجدد متغیرهای تصمیم مساله، به منظـور سـاختن گراف جدید مساله، نشان داده شده است. در ایـن شـکل ابتدا جواب بهینه یافته شده در جستجوی قبلی نشان داده شده است (شکل ۳– الـف). سـپس یـک بـازه اختیـاری، شامل جواب بهینه بدست آمده از مرحله قبـل بـه منظـور ساختن فضای جستجوی جدید مساله، انتخاب شده است (شـــکل ۳– ب). در نهایـــت در شـــکل (۳–ج) فـــضای جستجوی جدید مساله، که بـا گـسسته سـازی محـدوده جدید بدسـت آمـده بـرای هـر متغیـر تـصمیم و تعیـین گزینه‌های موجود برای آن سـاخته مـی شـود، نـشان داده شده است. در این شـکل هـا خـط چـین هـای عمـودی نشان‌دهنده نقاط تصمیم، دوایر توپر نشاندهنده گزینه‌های تصمیم، خطهای پررنگ مورب نـشاندهنده یـک جـواب ساخته شده توسـط مورچـه فرضـی و خـط چـین هـای مورب نشان‌دهنده محدوده های جدید تعریف شده برای هر متغیر تصمیم می باشد.



شکل ۲ نمایش شماتیک روش اول اعمال مکانیزم DAR به منظور ساختن گراف جدید مساله



شکل ۳ نمایش شماتیک روش دوم اعمال مکانیزم DAR به منظور ساختن گراف جدید مساله

مسائل نمونه

به منظور بررسی قابلیتهای مکانیزم های پیشنهادی، مسائل نمونه‌ای با اعمال روش‌های اول و دوم مکانیزم DAR و بکارگیری الگوریتم سیستم مورچه های بیشینه - کمینه حل شده است. لذا در این تحقیق، در ابتدا، دو تابع ریاضی پیچیده Ackley و XOR مورد بررسی قرار گرفته است و در ادامه مساله بهره برداری بهینه ساده و برقابی از مخزن سد دز، بعنوان یک مساله بهینه سازی واقعی در حوزه مهندسی اب، مورد بررسی قرار گرفته است.

تابع Ackley . به عنوان اولین مساله نمونه ریاضی، یافتن حداقل مقدار تابع ریاضی Ackley مورد نظر می باشد. تابع Ackley یک تابع پیوسته با توابع غیر خطی نمایی و کسینوسی می‌باشد. شکل کلی تابع مذکور به صورت زیرمی باشد [16]:

$$f(x) = 20 + e - 20\exp\left(-0.2\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i^2}\right) - \exp\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\cos(2\pi x_i)\right) \quad -5 \le x_i \le 5 \quad i = 1, 2, ..., n$$

(۸)

این تابع دارای چندین حداقل موضعی است که از هر طرف به سمت یک حداقل مطلق در حرکت می‌باشند. مقدار بهینه مطلق این تابع صفر می باشد که به ازای منظور کردن مقدار صفر برای متغیرهای تصمیم حاصل می شود. این تابع در حالت کلی دارای n بعد می باشد که در این تحقیق شکل (۱۰) بعدی این تابع برای حل مدنظرقرار گرفته است. روش‌های فراکاوشی، به دلیل ماهیت تصادفی آن‌ها دارای پارامترهای آزادی هستند که با تغییر مقدار این پارامتر ها، عملکرد الگوریتم، همگرایی و مرغوبیت جواب‌های حاصل از به کارگیری آن‌ها تغییر خواهد کرد. برای این مساله، با روش سعی و خطا، مقادیرمطلوب پارامترهای الگوریتم MMAS به صورت مقادیر جدول (۱) ارائه شده است. در این مساله، با توجه به شکل تابع، امکان ارائه تعریفی مناسب به منظور محاسبه مقادیر کاوشی وجود نداشته و بنابراین مقدار ضریب تاثیر آن صفر ($\beta = 0$) منظور شده است.

جدول ۱ مقادیر مطلوب پارامترهای الگوریتم MMAS

تعداد مورچه‌ها	α	β	ρ	p_{best}
۲۰	۱	۰	۰/۹۵	۰/٦

به منظور حل این مساله، متغیرهای تصمیم مساله، که در بازه [۵،۵-] تعریف شده است، با استفاده از تقسیم بندی۱۰، ۲۰ و ۱۰۰ تایی گسسته سازی شده است. نتایج حاصل از ۱۰ بار اجرای مدل، با استفاده از روش اول اعمال مکانیزم DAR و بدون استفاده از آن، در جدول (۲) ارائه شده است که در آن یک بار از یک و بار دیگر از دو گزینه تصمیم در همسایگی جواب بهینه یافته شده قبلی، به منظور تعریف فضای جستجوی جدید مساله، استفاده شده است. حداکثر تعداد تکرارها در تمامی اجراها برابر۱۰۰۰ در نظر گرفته شده است. همانگونه که از مقایسه نتایج جدول (۲) مشاهده می شود، بدون استفاده از مکانیزم DAR، در تقسیم بندی درشت متغیرهای تصمیم مساله دقت جوابهای یافته شده بسیار کم می باشد و تقسیم بندی ریز متغیرهای تصمیم مساله نیز نتوانسته است به اندازه اعمال مکانیزم DAR در یافتن جواب مناسب موثر واقع شود. همچنین، در حالت بدون استفاده از مکانیزم DAR، الگوریتم دچار همگرایی زود رس شده است و افزایش تلاش محاسباتی (افزایش تعداد تکرارها و یا مورچه ها) نیز نمی تواند منجر به یافتن جواب‌های مناسبتر گردد. در حالی که اعمال مکانیزم DAR موجب ایجاد شک در مکانیزم جستجو و فرار از گیر افتادن جواب‌ها در نقطه بهینه محلی و حرکت به سمت جواب های مناسبتر (نزدیک به بهینه مطلق) می‌شود.

جدول ۲ نتایج حداقل سازی تابع Ackley بدون استفاده و با استفاده از روش اول اعمال مکانیزم DAR

تعداد اجرا	بدون استفاده از مکانیزم DAR			با استفاده از روش اول مکانیزم DAR	
	۱۰تقسیم بندی	۲۰ تقسیم بندی	۱۰۰ تقسیم بندی	۲۰ تقسیم بندی	
				یک گزینه تصمیم	دو گزینه تصمیم
۱	٤/٤۳۰۷٥	۲/۸۲۲۹٥	۰/۳۳۳۳	۰/۰۰۹۷۹۳	۱/۲٥
۲	٤/٤۳۰۷٥	۲/۸۲۲۹٥	۰/۳۳۳۳	۱/۳۰۹۷۹	۰/۰۰۹
۳	٤/٤۳۰۷٥	۲/۸۲۲۹٥	۰/۳۳۳۳	۱/۹٥٤٥۳	۰/۲٥۹
٤	٤/٤۳۰۷٥	۲/۸۲۲۹٥	۰/۳۳۳۳	۱/۱۷۹٤۱	۲/۳۲
٥	٤/٤۳۰۷٥	۲/۸۲۲۹٥	۰/۳۳۳۳	۰/۰۱۱۲۲۳	۳/۲
٦	٤/٤۳۰۷٥	۲/۸۲۲۹٥	۰/۳۳۳۳	۰/۰۱٦۷٦۱	۰/۱۳٥
۷	٤/٤۳۰۷٥	۲/۸۲۲۹٥	۰/۳۳۳۳	۰/۰٦٥٥۹۲	٥/۱٦
۸	٤/٤۳۰۷٥	۲/۸۲۲۹٥	۰/۳۳۳۳	۱/۲۷۳٦۷	٤/٥٦
۹	٤/٤۳۰۷٥	۲/۸۲۲۹٥	۰/۳۳۳۳	٦/٦۳۸۱٦	۲/٥۸
۱۰	٤/٤۳۰۷٥	۲/۸۲۲۹٥	۰/۳۳۳۳	۰/۰٦٤۷٤٥	۰/۰٦٥٦
میانگین	٤/٤۳۰۷٥	۲/۸۲۲۹٥	۰/۳۳۳۳	۱/۲٥۲۳۷	۱/۹٥
بهترین جواب	٤/٤۳۰۷٥	۲/۸۲۲۹٥	۰/۳۳۳۳	۰/۰۰۹۷۹۳	۰/۰۰۹
بدترین جواب	٤/٤۳۰۷٥	۲/۸۲۲۹٥	۰/۳۳۳۳	٦/٦۳۸۱٦	٥/۱٦
انحراف معیار	۰	۰	۰	۲/۰۲٥۹۱۳	۱/۹۱۹٦۷٦
ضریب تغییرات	۰	۰	۰	۱/٦۱۷٦٦۳	۰/۹۸۳

تابع XOR . به عنوان دومین مساله نمونه ریاضی، تابع XOR که تابعی غیر خطی و نمایی است، مدنظر قرار گرفته است. شکل کلی این تابع به صورت زیر می باشد:

$$f_{(x)} = p^{-2} + q^{-2} + (1-r^{-1})^{-2} + (1-s^{-1})^{2}$$
$$-1 \le x_i \le 1 \qquad i = 1,2,3,.........,9$$
(۹)

$$p = 1+\exp\Big(-1\times x_{(7)} / \big(1+\exp(-1\times x_{(1)} - x_{(2)} - x_{(5)})\big) - x_{(8)} / (1+\exp(-1\times x_{(3)} - x_{(4)} - x_{(6)})) - x_{(9)}\Big)$$
(۱۰)

$$q = 1+\exp\Big(-1\times x_{(7)} / \big(1+\exp(-1\times x_{(5)})\big) - x_{(8)} / (1+\exp(-1\times x_{(6)})) - x_{(9)}\Big)$$
(۱۱)

$$r = 1+\exp\Big(-1\times x_{(7)} / \big(1+\exp(-1\times x_{(1)} - x_{(5)})\big) - x_{(8)} / (1+\exp(-1\times x_{(3)} - x_{(6)})) - x_{(9)}\Big)$$
(۱۲)

$$s = 1+\exp\Big(-1\times x_{(7)} / \big(1+\exp(-1\times - x_{(2)} - x_{(5)})\big) - x_{(8)} / (1+\exp(-1\times x_{(4)} - x_{(6)})) - x_{(9)}\Big)$$
(۱۳)

مساله مورد نظراز نوع حداکثر سازی و دارای ۹ متغیر تصمیم است. برای این مساله نیز مقادیرمطلوب پارامترهای الگوریتم MMAS به صورت مقادیر جدول (۱) ارائه شده است. به منظور حل مساله، متغیرهای تصمیم مساله، که در بازه [۱،۱-] تعریف شده است، با استفاده از تقسیم بندی ۱۰ تائی (تقسیم بندی درشت) و ۱۰۰ تایی (تقسیم بندی ریز) گسسته سازی شده است. نتایج حاصل از ۱۰ بار اجرای مدل، با استفاده از روش اول اعمال مکانیزم DAR و بدون استفاده از آن، در جدول (۳) ارائه شده است، که در آن یک بار از یک و بار دیگر از دو گزینه تصمیم در همسایگی جواب بهینه یافته شده قبلی، به منظور تعریف فضای جستجوی جدید مساله، استفاده شده است. حداکثر تعداد تکرارها در تمامی اجراها برابر۱۰۰۰ در نظر گرفته شده است. همانگونه که از مقایسه نتایج جدول (۳) مشاهده می‌شود، در حالت استفاده از روش اول اعمال مکانیزم DAR جواب های مطلوبتری نسبت به حالت بدون استفاده از مکانیزم DAR، در هر دو حالت تقسیم بندی درشت و ریز متغیرهای تصمیم مساله، به دست آمده است.

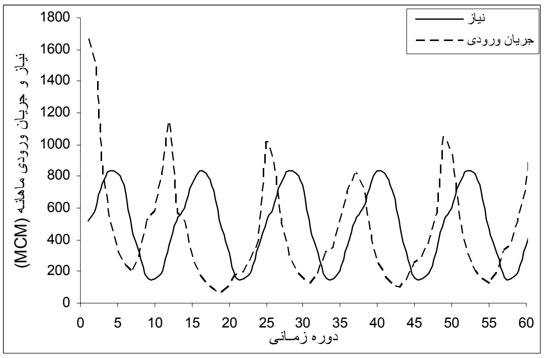
جدول ۳ نتایج حداقل سازی تابع XOR بدون استفاده و با استفاده از روش اول اعمال مکانیزم DAR

تعداد اجرا	بدون استفاده از مکانیزمDAR		با استفاده از روش اول مکانیزم DAR	
	۱۰ تقسیم بندی	۱۰۰ تقسیم بندی	۱۰ تقسیم بندی	
			یک گزینه تصمیم	دو گزینه تصمیم
۱	۲	۱/۹۷	۲/۹۲	۲/۹۲
۲	۲	۱/۹۸	۲/۹۲	۲/۹۲
۳	۱/۹۸	۱/۹۹	۲/۲۶	۲/۵۸
٤	۲	۱/۹۹	۲	۲
٥	۲	۱/۹۹	۲/۹۲	۲/۹۲
٦	۲	۱/۹۹	۲/۹۲	۲/۹۱
۷	۲	۱/۹۹	۲/۰۵	۲/٤۹
۸	۲	۱/۹۲	۲/۰۷	۲/۱۷
۹	۱/۹۹	۱/۹۹	۲/۹۲	۲/۹۲
۱۰	۲	۲	۲/۹۲	۲/۹۲
میانگین	۲	۱/۹۸	۲/۵۹	۲/٦۷
بهترین جواب	۲	۲	۲/۹۲	۲/۹۲
بدترین جواب	۱/۹۸	۱/۹۲	۲	۲
انحراف معیار	۰/۰۰٤٤۸۲	۰/۰۲۲۹۳۳	۰/٤۳۰۹۱۷	۰/۳٤۹۹٦٤
ضریب تغییرات	۰/۰۰۲۲٥	۰/۰۱۱٦	۰/۱٦٦	۰/۱۳۱

مساله بهره برداری بهینه از مخزن سد. به منظور نشان دادن قابلیت‌های مکانیزم DAR در حل مسایل حوزه مهندسی آب، دو مساله واقعی تک هدفه بهره برداری بهینه ساده و برقابی از مخزن سد مورد بررسی قرار گرفت. این مسائل از جمله مسائل بهینه سازی مقید می باشد، که به منظور تعریف مساله، لازم است که تابع هدف و قیود مساله تعریف شوند. تابع هدف در مساله بهره برداری از مخزن می تواند به صورت‌های مختلف تعریف گردد. تابع هدف می تواند حداکثر سازی درآمد، حداقل سازی هزینه، حداکثر سازی انرژی تولیدی، حداقل سازی میزان کمبود اعمال شده به یک نیاز مشخص و غیره در نظر گرفته شود. در این تحقیق، دو هدف حداقل سازی میزان کمبود اعمال شده نسبت به یک نیاز مشخص (در مساله بهره برداری ساده) و حداقل سازی کمبود توان تولیدی نسبت به ظرفیت نصب نیروگاه (در مساله بهره برداری برقابی) مدنظر قرارگرفته است.

به عنوان مسائل نمونه واقعی، از اطلاعات سد دز استفاده شده است. سد دز بلندترین سد ایران و در زمان ساخت نیز مرتفع ترین سد مخزنی در خاورمیانه بوده و بر روی رودخانه دز در استان خوزستان، جنوب غربی ایران ساخته شده است. محل سد در ۲۵ کیلومتری شمال شهرستان دزفول قرار دارد. رودخانه دز که از ارتفاعات غربی زاگرس (کوههای بختیاری) سرچشمه می گیرد از نظر میزان آبدهی دومین رودخانه ایران محسوب می شود و در ٤۵ کیلومتری شمال اهواز به رودخانه کارون می‌پیوندد. سد دز از نوع بتنی دوقوسی می باشد که ارتفاع آن از پی ۲۰۳ متر و از کف رودخانه ۱۹۰ متر است. عرض بدنه در پی ۲۷ متر و در تاج ٤/۵ متر، طول تاج ۲۱۲ متر و رقوم تاج سد ۳۵٤ متر از سطح دریا می‌باشد. سطح دریاچه در این رقوم به ٦۵ کیلومتر مربع می‌رسد.

در این مساله، حجم حداقل و حداکثر مخزن به ترتیب معادل ۸۳۰ و ۳۳٤۰ میلیون متر مکعب و حجم اولیه مخزن ۱۳٤۰ میلیون متر مکعب می باشد. از بین ٤۰ سال آمار، ۵ سال ابتدایی (٦۰ دوره ماهیانه) به منظور مدلسازی انتخاب گردید. مقادیر نیاز و ورودی های ماهیانه مشخص می باشد، به گونه ای که جمع ورودی ماهیانه به مخزن در این ٦۰ ماه معادل ۲٦۵۱۵ میلیون متر مکعب و جمع نیاز ماهیانه معادل ۲۹۵۰۲ میلیون متر مکعب میباشد. مقدار جریان ورودی به مخزن سد و مقادیر نیاز ماهانه در این ۵ سال آمار در شکل (٤) ارائه شده است. بدین ترتیب مقدار مجموع نیاز از مجموع آورد در این ۵ سال به اندازه ۲۹۸٦ میلیون متر مکعب بیشتر میباشد. علاوه بر ان، در این مساله، جهت تعین مقدار بار آبی موثر بر توربینها، تراز پایاب نیروگاه سد دز معادل ۱۷۲ متر از سطح دریا منظور شده است. این سد ۱۲۵۰۰۰ هکتار از اراضی پایین دست را آبیاری می کند و نیروگاه آن از ۸ واحد ۸۰/۸ مگاواتی تشکیل شده است که زمان کارکرد آن در طول روز حدود ۱۰ ساعت می‌باشد. به این ترتیب در محاسبات ضریب کارکرد (PF) معادل ۰/٤۱۷ منظور شده است. ظرفیت نصب نیروگاه معادل ٦۵۰ مگاوات و بازده آن معادل ۹۰٪ منظور گردیده است.



شکل ٤ مقادیر جریان ورودی و نیاز ماهانه در دوره زمانی۵ ساله

مساله بهره برداری ساده از مخزن سد. در این مساله تابع هدف به صورت حداقل سازی میزان کمبود اعمال شده نسبت به یک نیاز مشخص تعریف شده است:

$$\text{minimize} \quad O.F. = \sum_{t=1}^{NT}\left[(d_t - r_t)/d_{max}\right]^2 \qquad (۱٤)$$

که در رابطه فوق، d_t مقدار نیاز در دوره زمانی t (ماهیانه)؛ r_t مقدار آب رها شده از مخزن در دوره زمانی t و d_{max} حداکثر نیاز در تمام دوره‌های زمانی (NT) می‌باشد.

اولین گام به منظور حل مساله بهینه سازی با کمک الگوریتم بهینه سازی جامعه مورچه ها، تعریف گراف مساله می باشد. بدین منظور لازم است که نقاط تصمیم، متغیرهای تصمیم و گزینه های متغیرهای تصمیم مشخص شوند. در این مساله، دوره های زمانی بهره برداری از مخزن به عنوان نقاط تصمیم و مقدار آب رها شده از مخزن به عنوان متغیر تصمیم منظور شده است. گزینه های تصمیم مساله برابر با گسسته سازی های صورت گرفته برای مقادیر آب رها شده از مخزن سد در دوره های زمانی می باشد. شکل (۵) گراف مساله بهره برداری از مخزن، در حالتی که مقدار آب رها شده از مخزن بعنوان متغیر تصمیم منظور شده است را نشان می دهد.

اکثر مسایل بهینه سازی مقید می باشند، بنابراین لازم است علاوه بر تابع هدف، قیود مساله نیز تعریف شوند. قیود موجب می گردند تا برخی از جواب‌ها غیر شدنی باشند و بنابراین لازم است با اعمال مکانیزمی مورچه ها را به جستجو در فضای شدنی ترغیب نمود. قیود مساله بهره برداری ساده از مخزن به صورت رابطه پیوستگی، حداکثر و حداقل مقدار آب رها شده از مخزن و حجم مخزن تعریف می گردند. به طور کلی می توان قیود مساله را به شکل زیر تعریف نمود:

$$s_{t+1} = s_t + q_t - r_t \qquad (۱۵)$$

$$r_{min} \le r_t \le r_{max} \qquad (۱۶)$$

$$s_{min} \le s_t \le s_{max} \qquad (۱۷)$$

که در روابط فوق، s_t مقدار حجم مخزن در دوره زمانی t؛ s_{t+1} مقدار حجم مخزن در دوره زمانی t+1؛ q_t مقدار اب ورودی به مخزن در دوره زمانی t؛ r_t مقدار اب رها شده از مخزن در دوره زمانی t؛ r_{min} حداقل مقدار اب رها شده از مخزن؛ r_{max} حداکثر مقدار اب رها شده از مخزن؛ s_{min} حداقل مقدار حجم مخزن و s_{max} حداکثر مقدار حجم مخزن می باشد. در این مساله از روش تابع جریمه برای اعمال قیود استفاده شده است. در این روش تابع هدف مساله بصورت زیر اصلاح می‌شود:

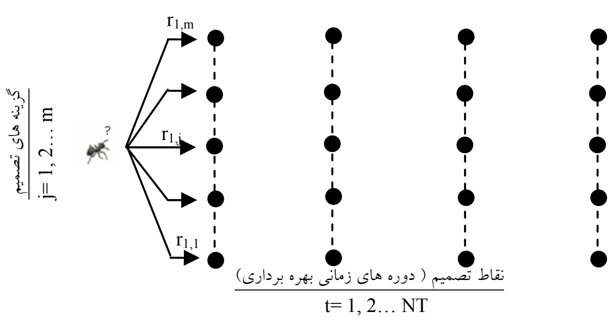
$$O.F. = \sum_{t=1}^{NT}(d_t - r_t / d_{max})^2 + \sum_{t=1}^{NT}(pen_t^{min} + pen_t^{max}) \qquad (۱۸)$$

که در آن

$$\begin{cases} Pen_t^{min} = c \times (s_{min} - s_t)/s_{min} & \text{if} \quad s_t < s_{min} \\ Pen_t^{max} = c \times (s_t - s_{max})/s_{max} & \text{if} \quad s_t > s_{max} \end{cases} \qquad (۱۹)$$

که در روابط فوق، Pen_t^{min} و Pen_t^{max} به ترتیب مقدار جریمه در نظر گرفته شده برای قید حداقل حجم و حداکثر حجم مخزن در دوره زمانی t و c ضریب ثابتی، که در این مساله برابر با ۱/۷ در نظر گرفته شده است، می باشد و سایر پارامترها پیش از این تعریف شده اند. با توجه به تابع هدف مساله مقدار اطلاعات کاوشی برای هر یک از جزء مسیرها (گزینه های تصمیم) بصورت رابطه زیر، بر حسب مقدار تابع هدف برای هر یک از جزء مسیرها، تعریف می شود:

$$\eta_{i,j} = 1 \Big/ \left[\left(d_i - r_{i,j}\right)/d_{max}\right]^2 \qquad (۲۰)$$



شکل ۵ گراف مساله بهره برداری از مخزن

که در رابطه فوق، $r_{i,j}$ j امین گزینـه تـصمیم (مقـدار آب رها شده از مخزن) در نقطه تصمیم i (دوره زمـانی t)، d_i مقدار نیاز در نقطه تصمیم i (دوره زمانی t) و d_{max} برابر با حداکثر مقدار نیاز در کل دوره های زمانی می باشد. به منظور بررسی نحوه عملکرد الگوریتم جامعه مورچه ها و مکانیزم پیشنهادی (مکانیزمDAR)، در مساله بهره برداری ساده از مخزن سد، از اطلاعات سد دز استفاده شده است. در این تحقیق، به منظور تعریف گـراف مـساله، محـدوده مجاز مقدار آب رها شده از مخزن [۰،۱۰۰۰] مـی باشـد. جدول (٤) مقادیر مطلوب پارامترهای بکار گرفته شده در الگوریتم MMAS به منظور حل مساله بهره برداری سـاده از مخزن سد دز را نشان می دهد.

جدول ٤ مقادیر مطلوب پارامترهای بکار گرفته شده در الگوریتم MMAS

تعداد مورچه ها	α	β	ρ	p_{best}
۱۰۰	۱	۰/۲	۰/۹۲	۰/٦٥

جدول (٥) نشان دهنده نتایج اسـتفاده از روش اول اعمال مکانیزم DAR در حل این مساله می باشـد کـه در آن از تعداد گزینه های تصمیم متفاوت، به منظور تعریـف فضای جستجوی جدید مساله، بهره گرفته شده اسـت. در این مساله، حداکثر تعداد تکرارها در همـه اجراهـا برابـر ۱۰۰۰ درنظر گرفته شده است. همانگونـه کـه از مقایـسه نتایج جدول (٥) مشاهده می‌شـود، اسـتفاده از دو گزینـه تصمیم در همسایگی جواب ساخته شده قبلی، به منظـور تعریف فـضای جـستجوی جدیـد مـساله در روش اول اعمال مکانیزم DAR، به نتایج بهتری منتهی شـده اسـت. همچنین، در جدول (٦) نتایج روش دوم اعمـال مکـانیزم DAR و با بهره گیری از بـازه هـای مختلـف ارائـه شـده است. مقایسه نتایج نشاندهنده انست که بـا انتخـاب بـازه ۰/۸، نسبت به سایر بازه ها، جواب مطلوب‌تری برای این مساله حاصل شده است. همچنین، نتایج بهترین جوابهای حاصـل از اسـتفاده از روش اول و دوم اعمـال مکـانیزم DAR با جوابهای حاصل از بکارگیری الگوریتم MMAS بدون اعمـال مکـانیزم DAR در جـدول (۷) ارائـه شـده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد کـه اسـتفاده از مکـانیزم DAR تاثیرقابل ملاحظـه ای در بهبـود جـواب‌هـا داشـته است.

جدول ٥: مقایسه نتایج روش اول اعمال مکانیزم DAR به ازای تعداد گزینه های تصمیم متفاوت

تعداد اجرا	با استفاده از روش اول مکانیزم DAR			
	تعداد گزینه های تصمیم			
	۱	۲	۳	٤
۱	۰/۷۹۱۹۰۲	۰/۷٥۰۸٤	۰/۷٦۲٦٤	۰/۸۲٤۳۰۳
۲	۰/۹۹٤۳۰۲	۰/۸۸۲۳۷	۰/۸۳۹۸۸٦	۰/۹٦۸۰٦
۳	۱/۰۹۷۹٦	۰/۹۸٤۲۳۷	۰/۹۱۱٤۰۱	۰/۹۲٤۱۹
٤	۰/۹۳٦۳٥٤	۰/۸۷٥۷۸٦	۰/۸۷٦۰۲	۰/۸۸٤۹٤۸
٥	۲/۳۱۲۱۷	۲/۰٥۰۰٥	۱/۹۰۷۸٦	۱/۸۰۹۱۹
٦	۱/٥٤۳٦۸	۱/۳۷٦٤٦	۱/۹۰۷۸٦	۱/۲٥۸٤۷
۷	۱/۲۸۱۹۹	۱/۱۳۷۳۱	۱/۱٤٥۱٥	۱/۰۷۲٦۷
۸	۰/۹۹۷۹٤۷	۰/۹۷٤٥٦۱	۰/۹۱۹۸۷۲	۰/۹۲۹۲۰٦
۹	۰/۹۳۸۰۲۲	۰/۸٦۳۹۱۷	۰/۸٥۰۲۲۸	۰/۹۹۰٤۳
۱۰	۱/۰۳٤۰۷	۱/۰۳٤۰۷	۱/۰۳٤۰۷	۱/۰۳٤۰۷
میانگین	۱/۱۹۲۸٤	۱/۰۹۳۲٥	۱/۰٥۲۲٤	۱/۰٦۹٥٥
بهترین جواب	۰/۷۹۱۹۰۲	۰/۷٥۰۸٤	۰/۷٦۲٦٤	۰/۸۲٤۳۰۳
بدترین جواب	۲/۳۱۲۱۷	۲/۰٥۰۰٥	۱/۹۰۷۸٦	۱/۸۰۹۱۹
انحراف معیار	۰/٤٤٥٥۹۸	۰/۳۷۸٤۰۱	۰/٤۳۰۹۲۹	۰/۲۸٥۸۹۸
ضریب تغییرات	۰/۳۷۳٥٦۱	۰/۳٤٦۱۲٥	۰/٤۰۹٥۳٥	۰/۲٦۷۳۰۷

جدول ٦ مقایسه نتایج روش دوم اعمال مکانیزم به ازای طول بازه های متفاوت

تعداد اجرا	با استفاده از روش اول مکانیزمDAR				
	طول بازه				
	۰/۳	۰/۵	۰/۷	۰/۸	۰/۹
۱	۱/۰۷۷۳۷	۰/۹۲۱۸۳٦	۰/۸۲۱٤۸	۰/۸۱۱۸۳۲	۰/۸۲۹۳۵۸
۲	۱/٤٦۹٦۷	۱/۱۷٤۰۳	۱/۰۹۰۲۵	۰/۹٤۳۳	۱/۰۸۳۱۷
۳	۱/۵٦۹۳۵	۱/۰۹۲۱۱	۱/۰٤۸۱۸	۱/۰۹٤۵۸	۱/۱٦۲۰۱
٤	۱/٦۳۹۷۵	۱/۲٦۳۸۵	۰/۹٤۰۸۵۹	۱/۰۰۵۹	۰/۹۹٦۵۵
۵	۲/۵٤۲۷۹	۱/۷۵۰٦۵	۱/٦۵٤۹۸	۱/۸۸٤٦	۲/۲۵۰۳۸
٦	۲/۱۲٦۱٤	۱/۲۹۵۸۳	۱/۲۷۱٤٦	۱/۳۱۵۵۷	۱/٤۸۹٦۸
۷	۲/۱٦٤٤٦	۱/۳۷۵۳۵	۱/۱۳۲۷۷	۱/۲۰۸۰۷	۱/۳۱۰۵٦
۸	۱/۹۹۲۱	۱/۳۲۷۳۹	۱/۰۲٤۸	۱/۰۰٦۷۵	۱/۰٦٤۹۲
۹	۱/۸۱۸۱	۱/۱٦۳۹۱	۰/۹٤٤٤٤	۰/۹۵۱۳۱۲	۰/۹۸۷۲
۱۰	۱/۰۳٤۰۷	۱/۰۳٤۰۷	۱/۰۳٤۰۷	۱/۰۳٤۰۷	۱/۰۳٤۰۷
میانگین	۱/۷٤۳۳۸	۱/۲۳۹۹	۱/۰۹٦۳۳	۱/۱۲۵٦	۱/۲۲۰۷۹
بهترین جواب	۱/۰۳٤۰۷	۰/۹۲۱۸۳٦	۰/۸۲۱٤۸	۰/۸۱۱۸۳۲	۰/۸۲۹۳۵۸
بدترین جواب	۲/۵٤۲۷۹	۱/۷۵۰٦۵	۱/٦۵٤۹۸	۱/۸۸٤٦	۲/۲۵۰۳۸
انحراف معیار	۰/٤۸۲۲۳٤	۰/۲۲۷۵٦۱	۰/۲۳۰۵۱۲	۰/۳۰۱٦۳	۰/٤۰۵۵۲۳
ضریب تغییرات	۰/۲۷٦٦۰۹	۰/۱۸۳۵۳۲	۰/۲۱۰۲۵۸	۰/۲٦۷۹۷۳	۰/۳۳۲۱۸۱

جدول ۷ : نتایج مساله بهره برداری ساده مخزن بدون استفاده و با استفاده از روش اول و دوم اعمال مکانیزم DAR

تعداد اجرا	بدون استفاده از مکانیزم DAR	با استفاده از مکانیزم DAR	
		روش اول	روش دوم
۱	۰/۹۲٦۰۲۵	۰/۷۵۰۸٤	۰/۸۱۱۸۳۲
۲	۰/۹۲٦۰۲۵	۰/۸۸۲۳۷	۰/۹٤۳۳
۳	۱/۲۰۹۸٦	۰/۹۸٤۲۳۷	۱/۰۹٤۵۸
٤	۱/۰۵۱۷	۰/۸۷۵۷۸٦	۱/۰۰۵۹
۵	۱/۱۱٤۱٦	۲/۰۵۰۰۵	۱/۸۸٤٦
٦	۱/۰۳۳٦۱	۱/۳۷٦٤٦	۱/۳۱۵۵۷
۷	۱/۰٤۸۵	۱/۱۳۷۳۱	۱/۲۰۸۰۷
۸	۱/۰۳۲۹۱	۰/۹۷٤۵٦۱	۱/۰۰٦۷۵
۹	۱/۱۰۷۱۹	۰/۸٦۳۹۱۷	۰/۹۵۱۳۱۲
۱۰	۱/۰۳٤۰۷	۱/۰۳٤۰۷	۱/۰۳٤۰۷
میانگین	۱/۰٦۳۱۱	۱/۰۹۳۲۵	۱/۱۲۵٦
بهترین جواب	۰/۹۲٦۰۲۵	۰/۷۵۰۸٤	۰/۸۱۱۸۳۲
بدترین جواب	۱/۲۰۹۸٦	۲/۰۵۰۰۵	۱/۸۸٤٦
انحراف معیار	۰/۰۸٤٦٤۱	۰/۳۷۸٤۰۱	۰/۳۰۱٦۳
ضریب تغییرات	۰/۰۷۹٦۱٦	۰/۳٤٦۱۲۵	۰/۲٦۷۹۷۳

این مساله با استفاده از نرم افـزار LINGO (نـسخه ۸) مدل شده و جـواب ۰/۷۳۱۶ بـرای آن حاصـل شـده است. همچنین، این مساله را جلالـی [۱۷] بـا بکـارگیری الگوریتم سیستم جامعه مورچـه هـا و معرفـی الگـوریتم ACS_{gb} مـورد بررسـی قـرار داد و بـا بکـارگیری ۱۵۰ مورچه و در ۵۰۰ تکرار مقدار ۰/۹۴۹ را برای این مـساله بدست آورد. در این مقاله، بهترین جواب بدست امـده از بکارگیری الگوریتم MMAS بدون اعمال مکـانیزم DAR برابر با ۰/۹۲۶۰۲۵ می باشد. همچـنین، بهتـرین. جـواب بدست امده با استفاده از روش اول و دوم اعمال مکـانیزم DAR بترتیب برابر با ۰/۷۵۰۸٤ و ۰/۸۱۱۸۳۲ مـی باشـد، که نشان دهنده بهبود جوابها، بـدلیل بکـارگیری مکـانیزم DAR، می باشد. مقایسه نتایج نشان دهنده آنست کـه بـا بکارگیری الگوریتم MMAS بدون اعمال مکـانیزم DAR و بـا اسـتفاده از روش اول و دوم اعمـال مکـانیزم DAR جوابهائی نزدیک به جواب بهینه مطلق حاصل شده است. این مساله یک مساله پیوسته می باشد اما الگوریتم جامعـه مورچگان یک الگوریتم گسسته می باشد و همین موضوع علت تفاوت جواب‌هـا بـا جـواب حاصـل از نـرم افـزار LINGO می باشد. همچنین، در حالت بدون اسـتفاده از مکانیزمDAR، الگوریتم دچـار همگرایـی زود رس شـده است؛ در حالیکه اعمال مکانیزم DAR موجب ایجاد شک در مکانیزم جستجو و فرار از گیر افتادن جواب‌ها در نقطه بهینه محلی و حرکـت بـه سـمت جـواب هـای مناسـبتر (نزدیک به بهینه مطلق) می شود.

مساله بهره برداری برقابی از مخزن سد. در این مـساله تابع هدف به صورت حداقل سازی کمبود تـوان تولیـدی نسبت به ظرفیت نصب نیروگاه تعریف شده است.

$$\min imize \quad O.F.=\sum_{t=1}^{NT}\left(1-\frac{P_t}{Power}\right) \qquad (۲۱)$$

که در را بطه فوق، P_t توان تولیدی در دوره زمانی t و Power ظرفیت نصب نیروگاه می باشد.

علاوه بر قیود منظور شده برای مساله بهره بـرداری ساده، قیود دیگری نیز برای مساله بهره برداری برقـابی از مخزن می بایست منظور گردد. به عنوان نمونه، به منظـور محاسبه توان تولیدی، علاوه بـر میـزان آب رهـا شـده از مخزن، میزان بار آب موثر بر توربین‌هـا نیـز مـی بایـست تعریف گردد. بنابراین، مساله بهره برداری بهینه برقـابی از مخزن سد دارای قیود غیر خطی بوده و فضای جستجوی آن به صورت غیر محدب (Non Convex) می باشـد. بـه طور کلی قیود این مساله را می توان به شکل زیر تعریف نمود:

$$s_{t+1}=s_t+q_t-r_t \qquad (۲۲)$$

$$P_t=\min\left((\gamma\times\eta\times r_t\times h_t\times co_t)/PF, Power\right) \qquad (۲۳)$$

$$h_t=(H_t+H_{t+1})/2-TWL \qquad (۲٤)$$

$$H_t=f(S_t) \qquad (۲۵)$$

$$r_{min}\le r_t\le r_{max} \qquad (۲٦)$$

$$s_{min}\le s_t\le s_{max} \qquad (۲۷)$$

کـه روا بـط فـوق، γ وزن مخـصوص آب؛ η بـازده نیروگاه؛ h_t بار آبی مـوثر بـر نیروگـاه در دوره زمـانی t؛ PF ضریب کارکرد نیروگاه؛ co_t ضریب تبدیل حجم به دبی در دوره زمانی t؛ H_t تـراز مخـزن در دوره زمـانی t (تابعی از حجم مخـزن در دوره زمـانی t) و TWL تـراز پایاب نیروگاه مـی باشـد. سـایر پارامترهـا پـیش از ایـن تعریف شده است.

اولین گام حل مـساله، تعریـف گـراف مـساله مـی باشد. متغیر تصمیم در نظرگرفته شده در این مساله، مقدار آب رها شده از مخزن سد بوده و گراف ایـن مـساله نیـز همانند گراف تعریف شده برای مساله بهره برداری سـاده از مخزن (شکل ۵) می باشد.

بعنوان یک مساله واقعی، مـساله تـک هدفـه بهـره برداری برقابی از مخزن سد دز مورد بررسی قرار گرفـت. اطلاعات اولیه این مساله پیش از ایـن ارائـه شـده اسـت.

همچنین، به منظور محاسبه میزان بار ابی موثر بر توربینها، با استفاده از اطلاعات حجم- ارتفاع مخزن، یک تابع چند جمله ای درجه سوم به صورت زیر بر آنها برازش داده شده است:

$$H_t = a + b \times S_t + c \times S_t^2 + d \times S_t^3$$
$$a = 249.83364,\ b = 0.0587205,$$
$$c = -1.37 \times 10^{-5},\ \ d = 1.526 \times 10^{-9}$$

(۲۸)

برای اعمال قیود این مساله نیز از روش تابع جریمه ای که در مساله بهره برداری ساده شرح داده شد، استفاده شده است. مقدار ضریب جریمه در نظر گرفته شده در این مساله برابر با ۱۳۰ می باشد. در این تحقیق، به منظور تعریف گراف مساله، محدوده مجاز مقدار آب رها شده از مخزن ([۱۰۰۰، ۰]) به ۱۱ دسته مساوی تقسیم شده است. مقدارمطلوب پارامترهای الگوریتم MMAS، که از طریق آزمون و خطا بدست آمده اند، در جدول (۸) نشان داده شده اند. در این مساله، به دلیل عدم امکان جدا سازی پارامترهای مقدار آب رها شده از مخزن سد و تراز مخزن (که تابع حجم مخزن می باشد) در تابع هدف، امکان تعریف اطلاعات کاوشی برای هر یک از جزء مسیرها وجود نداشته و بنابراین ضریب تاثیر آن صفر منظور شده است ($\beta = 0$). جدول (۹) نتایج حاصل از حل این مساله بدون استفاده و با استفاده از روش دوم اعمال مکانیزم DAR را، به ازای ۱۰ اجرای مختلف، نشان می دهد؛ که در آن از طول بازه ۰/۶، به منظور تعیین فضای جستجو جدید مساله در هر تکرار، استفاده شده است. حداکثر تعداد تکرارها در همه اجراها برابر ۲۰۰۰ در نظر گرفته شده است. در این مساله از روش دوم اعمال مکانیزم DAR استفاده شده است. مقایسه نتایج نشان می دهد که اعمال مکانیزم DAR تاثیرقابل ملاحظه‌ای در بهبود جوابها داشته است.

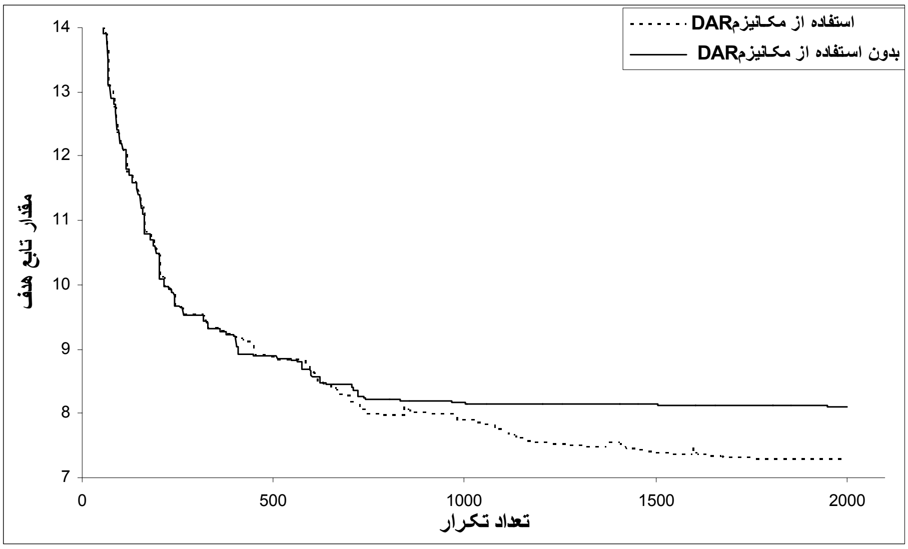
جدول ۸ مقادیر مطلوب پارامترهای الگوریتم MMAS

تعداد مورچه ها	α	β	ρ	p_{best}
۱۰۰	۱	۰	۰/۹۵	۰/۵٦

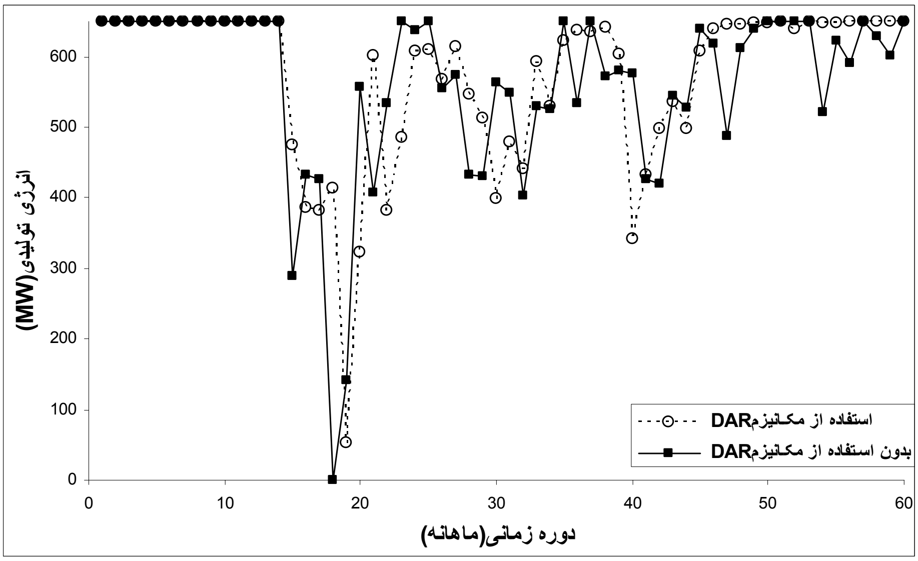
جدول ۹ نتایج‌مساله‌بهره برداری برقابی از مخزن بدون استفاده و با استفاده از روش دوم اعمال مکانیزم DAR

تعداد اجرا	بدون استفاده از مکانیزم DAR	با استفاده از روش دوم مکانیزم DAR
۱	۸/۲۷۱۲۹	۷/۵۹۹۲٤
۲	۸/۲۵۳٦۱	۷/٦۲۸۷۳
۳	۸/۱۳۲۳۲	۷/۹۸۷۸۱
٤	۸/۱۸۰۱۵	۷/۷۱۵۵۵
۵	۸/۲۰۷۷۹	۷/٤٥٤
٦	۸/٤۳۰٦	۷/۷۳۸۵۱
۷	۸/۱٤۸۹۹	۷/۲۷۷۷۳
۸	۸/۳۸۵۸٦	۷/٤٥۳۰۹
۹	۸/۵۳۷۸۳	۷/٦٤۹۵۲
۱۰	۸/۱۰٤٥٤	۷/٤۳٤٦۱
میانگین	۸/۲٦۵۳	۷/۵۹۳۸۷۹
بهترین جواب	۸/۱۰٤٥٤	۷/۲۷۷۷۳
بدترین جواب	۸/۵۳۷۸۳	۷/۹۸۷۸۱
انحراف معیار	۰/۱٤۲۹۵۲	۰/۱۹۹۹۹
ضریب تغییرات	۰/۰۱۷۲۹۵	۰/۰۲٦۳۳۵

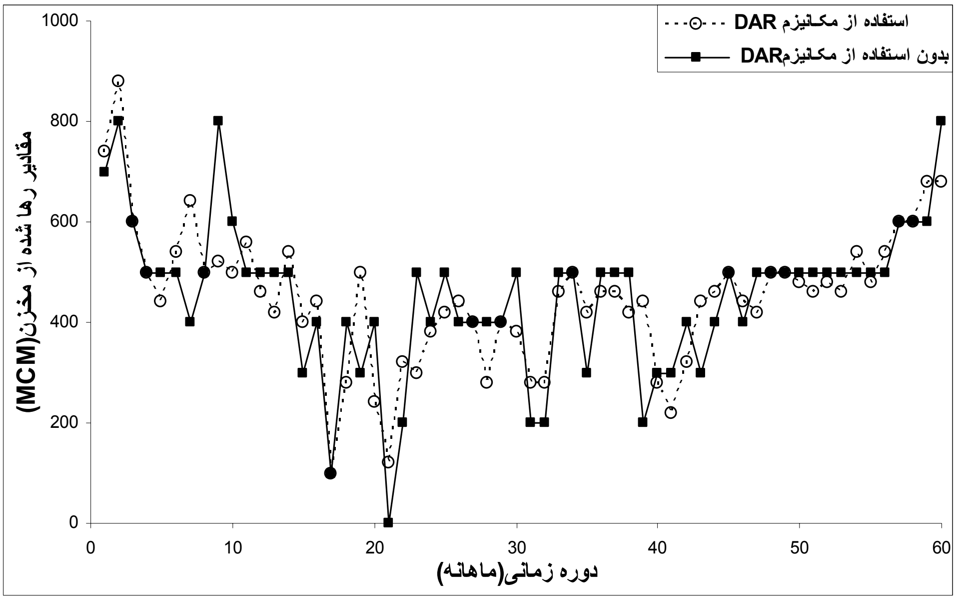
نحوه همگرایی جواب‌ها برای بهترین جواب به دست آمده، در دو حالت بدون استفاده و با استفاده از روش دوم اعمال مکانیزم DAR، در شکل (۶) نشان داده شده است. همچنین، مقادیر انرژی تولیدی و آب رها شده از مخزن در ماه‌های مختلف، در دو حالت بدون استفاده و با استفاده از روش دوم اعمال مکانیزم DAR، به ترتیب در شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده است.



شکل ٦ نحوه همگرایی جواب‌ها در مساله بهره برداری برقابی از مخزن سد دز در دو حالت بدون استفاده و با استفاده از روش دوم اعمال مکانیزمDAR



شکل ۷ مقادیر انرژی تولیدی در مساله بهره برداری برقابی از مخزن سد دز در دو حالت بدون استفاده و با استفاده از روش دوم اعمال مکانیزم DAR



شکل ۸ مقادیر آب رها شده از مخزن در مساله بهره برداری برقابی از مخزن سد دز در دو حالت بدون استفاده و با استفاده از روش دوم اعمال مکانیزم DAR

این مساله با استفاده از نرم افزار LINGO (نسخه ۸) مدل شده و جواب ۷/۳۷۲ برای آن حاصل شده است. همچنین، این مساله را جلالی [۱۷] با بکارگیری الگوریتم سیستم جامعه مورچه ها و معرفی الگوریتم ACS_{gb} مورد بررسی قرار داد و با بکارگیری ۱۰۰ مورچه و در ۵۰۰ تکرار مقدار ۳۷/۲ را، که یک جواب ناشدنی است، برای این مساله به دست آورد. مقایسه نتایج جدول (۹) نشان‌دهنده آنست که بهترین جواب به دست آمده از بکارگیری الگوریتم MMAS بدون استفاده از مکانیزم DAR برابر با ۸/۱۰٤ می باشد. همچنین، بهترین جواب بدست امده از استفاده از روش دوم اعمال مکانیزم DAR برابر با۷/۲۷۷ می باشد، که از جواب حاصل از مدل سازی در نرم افزار LINGO هم بهتر بوده است و نشان دهنده بهبود جواب‌ها به دلیل بکارگیری مکانیزم DAR می باشد. مقایسه نتایج نشان دهنده آنست که با بکارگیری الگوریتم MMAS بدون اعمال مکانیزم DAR و استفاده از روش دوم اعمال مکانیزم DAR جواب‌هائی نزدیک به جواب بهینه حاصل شده است. این مساله یک مساله پیوسته می باشد اما الگوریتم جامعه مورچگان یک الگوریتم گسسته می باشد و همین موضوع علت تفاوت جوابها با جواب بهینه مطلق مساله می باشد. مساله بهره برداری برقابی یک مساله غیر خطی غیر محدب می باشد و لذا جواب بهینه حاصل شده از نرم افزار LINGO یک جواب بهینه موضعی می باشد و امکان پیدا کردن جواب بهینه مطلق به دلیل مشکلات حل مسایل با استفاده از روشهای برنامه ریزی غیر خطی، غیر ممکن می باشد. همچنین، در حالت بدون استفاده از مکانیزمDAR، الگوریتم دچار همگرایی زود رس شده است؛ در حالی‌که اعمال مکانیزم DAR موجب ایجاد شک در مکانیزم جستجو و فرار از گیر افتادن جوابها در نقطه بهینه محلی و حرکت به سمت جواب های مناسبتر (نزدیک به بهینه) می شود.

نتیجه گیری

در این تحقیق مکانیزم مناسبی موسوم به تظریف تطبیقی قطعی، به منظور افزایش قابلیت الگوریتم بهینه سازی

جامعه مورچه ها برای حل مسائل بهینــه ســازی پیوســته، ارائه شد. برای اعمال این مکانیزم دو روش پیشنهاد شـد. نتایج این تحقیق نشان داد که بکارگیری مکانیزم تظریـف تطبیقی قطعی در الگوریتم بهینه سازی جامعه مورچه هـا در جهت نزدیکتر شدن بـه جـواب هـای بهینـه در حـل مسائل بهینه سازی پیوسـته، کـه یکـی از چالـشهای ایـن الگوریتم محسوب مـی شـود، بـسیار مـوثر بـوده اسـت. قابلیت‌های مکـانیزم پیـشنهادی، بـا بکـارگیری الگـوریتم سیستم مورچه بیشینه – کمینه، در حل چند مساله ریاضی پیچیده و در مساله بهره برداری بهینـه سـاده و برقـابی از مخزن سد دز مورد آزمون قرار گرفته و نتایج حاصـل بـا نتایج حاصل از بکارگیری سایر روشها مقایسه شده است. مقایسه نتایج نشان‌دهنـده بهبـود نتـایج در نتیجـه اعمـال مکانیزم پیشنهادی بوده است.

مراجع

1. Afshar، M. H.، “Application of Max-Min ant algorithm to joint layout and size optimization of pipe network”، Engineering optimization، 38(3)، pp. 299-317، (2006a).
2. Colorni، A.، Dorigo، M.، Maniezzo، V.، “Ant System: An autocatailytic optimizing process”، Tech.Report 91-016، Politecnico di Milano، Italy، (1991).
3. Dorigo، M.، and Gambardella، L. M.، “Ant colony system: A cooperaive learning approach to the traveling salesman problem”، IEEE Transactions on Evolutionary Computation، 1(1)، pp. 53-66، (1997).
4. Bullnheimer، B.، Hartl، R.F.، Strauss، C.، ”A new rank-based version of the ant system:A computational study”، *Central European Journal for Operations Research and Echonomics*، 7(1)، pp. 25-38، (1999).
5. Stutzle، T.، and Hoos، H. H.، ”Max-Min Ant system”، Future Generation Computer System، 16(9)، pp. 889-914، (2000).
6. Cordon، O.، Fernandez de Viana، I.، Herrena، F.، Moreno، L.، “A new ACO model integrating evolutionary computation concepts: the best-worst ant system”، In Prceedings of ANTS'2000-From Ant Colonies to Artifical Ants: Second International Workshop on Ant Algorithms، Brussels، Belgium، pp. 22-29، (2000).
7. Gambardella، L. M، and Dorigo، M.، “An ant colony system hybridized with a new local search for the sequential ordering problem”، *Inform Journal on Computing*، 12(3)، pp. 237-255، (2000).
8. Afshar، M. H.، and Moeini، R.، “Partially and Fully Constrained Ant Algorithms for the Optimal Solution of Large Scale Reservoir Operation problems”، *J. Water Resour. Manage*، 22(1)، pp. 1835-1857، (2008).
9. Abbaspour، K.C.، Schulin، R.، Van Genuchten، M. T.، “Estimating unsaturated soil hydrulic parameters using ant colony optimization”، Adv. water resours، 24(8)، pp. 827-841، (2001).
10. Simpson، A.R.، Maier، H.R.، Foong، W.K.، Phang، K.Y.، Seah، H.Y.، Tan، C.L.، “Selection of parameters

for ant colony optimization applied to the optimal design of water distribution systems"، Procceding in Int. Congress on Modeling and Simulation، Canberra، Australia، pp. 1931-1936، (2001).

11. Maier، H.R.، Simpson، A.R.، Zecchin، A.C.، Foong، W.K.، Phang، K.Y.، Seah، H.Y.، Tan، C.L.، "Ant colony optimization for design of water distribution system"، *J. Water Resour.* Plng. and Mgmt.، 129(3)، pp. 200-209، (2003).
12. Zecchin، A.C.، Maier، H. R.، Simpson، A. R.، Roberts، A.، Berrisford، M. J.، Leonard، M.، "Max-Min ant system applied to water distribution system optimization"، Modsim 2003-International Congress on Modeling and Simulation، Modeling and Simulation Society of Australia and New Zealand Inc.، Townsville، Australia، 2، pp. 795-800، (2003).
13. Zecchin، A.C.، Simpson، A.R.، Maier، H.R.، Leonard، M.، Roberts، A.، Berrisford، M.J.، "Application of two ant colony optimisation algorithms to water distribution system optimization"، Mathematical and Computer Modelling، 44، pp. 451-468، (2005).
14. Afshar، M. H.، "Improving the efficiency of ant algorithms using adaptive refinement: Application to storm water network design"، Advances in Water Resources، 29(9)، pp. 1371-1382، (2006b).
15. Manielzo، V.، Colorni، A.، "The ant system: optimization by a colony of cooperating ants"، IEEE Trans. Syst Man. Cybern.، 26(1)، pp. 29-42، (1996).
16. Gen، M.، and Cheng، R.W.، "Genetic Algorithms and Engineering Design"، John Wiley and Sons Inc.، (1997).

۱۷. جلالی، محمد رضا، "طراحی و بهره برداری بهینه از هیدرو سیستمها با الگوریتم جامعه مورچه ها یک رهیافت فراکاوشی جدید"، رساله دکتری، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده عمران، (۱۳۸٤).